

DESINFECCIÓN SOLAR EN COMUNIDADES RURALES AISLADAS: PRIMEROS RESULTADOS

Christian Navntoft¹, Paula Araujo^{1,2}, Marta I. Litter^{1,2,6}, María C. Apella^{2,3,4}, Diego Fernández^{4,5}, María Elena Puchulu⁴, Margarita del V. Hidalgo⁴, L. Dawidoski¹ y Miguel A. Blesa^{1,2,6}

navntoft@cnea.gov.ar

¹Unidad de Actividad Química, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Buenos Aires, Argentina

²Consejo de Investigaciones Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Centro de Referencia para Lactobacilos (CERELA)

⁴Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina

⁵Servicio Geológico Minero Argentino, Tucumán (SEGEMAR)

⁶Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de General San Martín

En este trabajo se presentan los resultados de desinfección solar de coliformes totales de los ensayos realizados durante el período marzo-junio de 2005 en la localidad de "Los Pereyra", Tucumán con un fotorreactor solar. El mismo consta de espejos de tipo CPC que concentran la radiación UV alrededor de cuatro tubos de vidrio. Dos con un fotocatalizador (óxido de titanio) y dos con un fotosensibilizador. El agua contaminada circula por la sección anular que existe entre el tubo de vidrio y el soporte. La bomba que impulsa el fluido se alimenta por energía solar a través de un panel fotovoltaico. Se evaluó la eficiencia del proceso de desinfección del fotorreactor en condiciones de intemperie y bajo distintas condiciones climáticas, mostrando en la mayoría de los casos, una desinfección total al cabo de 6 horas de exposición. Distintos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se midieron simultáneamente con las variables del proceso.

Palabras clave: Fotocatálisis, Fotosensibilización, desinfección solar, Tucumán.

Introducción

Existen en nuestro país un gran número de poblaciones rurales dispersas y alejadas. La mayoría de estas poblaciones no tienen acceso a sistemas de suministro de agua potable. Dentro de las perspectivas políticas de las diferentes regiones, no se encuentra contemplado la inclusión de estas zonas en la planificación de las futuras redes de abastecimiento de agua potable, razón por la cual sólo cuentan (y contarán en un futuro próximo) con agua obtenida de pozos someros. Como su nombre lo indica, los pozos someros son tomas de agua de napas que se encuentran a una profundidad de entre 5 y 10 metros. Debido a la falta de infraestructura, estos caseríos, cuentan con pozos ciegos que funcionan como receptores de los desechos domésticos. Por esta razón el agua de consumo se encuentra contaminada por materia orgánica, inorgánica y microorganismos provenientes de los pozos ciegos que utiliza la misma población. Usualmente, la contaminación es de tipo bacteriológica (enterobacterias) debido al contacto del agua de consumo humano con el de las aguas de letrina. Algunas poblaciones remedian este problema utilizando métodos convencionales como el agregado de lavandina y otras ni siquiera lo contemplan. Otras veces, los recursos no alcanzan para implementar un método de tratamiento, como por ejemplo en zonas áridas la escasez de leña para calentar el agua, o las distancias a recorrer para obtener los desinfectantes son demasiado grandes. En el marco de esta problemática es que surge la necesidad de investigar la aplicación de la desinfección solar de aguas. En este sentido, se han desarrollado destiladores solares, y existen importantes esfuerzos para implementar el método llamado SODIS (Solar DISinfection) en botellas individuales de PET. El presente trabajo apunta al desarrollo y prueba de fotorreactores dentro de las llamadas Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAOs). Las TAOs solares se basan en la generación solar de radicales libres altamente oxidantes que atacan a las bacterias.

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos con el fotorreactor utilizando agua contaminada con materia orgánica proveniente de un pozo somero perteneciente a la familia Amaya, de la localidad de Los Pereyra, situada en la provincia de Tucumán. El tratamiento combina dos tecnologías de oxidación avanzada, la fotocatálisis heterogénea y la fotosensibilización. La primera consiste en la generación de huecos en la superficie de un semiconductor (TiO_2) por activación con la radiación solar UV (280 nm-400 nm). Los huecos generados reaccionan con iones OH^- en superficie para formar el radical OH^\bullet y este a su vez puede atacar a las bacterias adsorbidas sobre el semiconductor/catalizador o bien estas especies oxidantes migran a una pequeña distancia y atacan a las mismas en la solución[1]. La segunda tecnología (fotosensibilización) genera el oxígeno singlete, (agente oxidante de alta energía) mediante la captación de la luz solar del espectro visible y posterior transferencia de energía al oxígeno disuelto. En este caso, la captación de la energía de la luz solar se realiza a través de un compuesto de coordinación a base de Rutenio cuya composición es similar a los compuestos de la

clorofila que permite que las plantas utilicen la radiación solar para la generación de materia orgánica[2]. De esta manera, la combinación de ambos tratamientos permite maximizar el aprovechamiento del espectro solar y por ende la eficiencia del proceso. El reactor fue diseñado y construido por los socios europeos del proyecto con el aporte científico de todo el consorcio.

La implementación de este trabajo fue realizada en el marco del proyecto ICA4-CT-2002-10001. Cost Effective Solar Photocatalytic Technology to Water Decontamination and Desinfection in Rural Areas of Developing Countries, SOLWATER, financiado por la European Commission.

Situación actual de “Los Pereyra”

La localidad “Los Pereyra” está ubicada sobre la ruta provincial N° 327, a 49 Km. al sureste de la ciudad de San Miguel de Tucumán en el departamento de Cruz Alta, en el Noroeste argentino. Sus coordenadas geográficas son 26° 51' de latitud sur y 64° 53' de longitud oeste.

El uso principal de los terrenos es de tipo agrícola en donde se cultiva soja y trigo.

La población está estimada en 2500 personas. Cuenta con tendido eléctrico pero solo a lo largo de la ruta provincial N° 327, las casas que se encuentran alejadas no cuentan con este servicio. No tienen acceso a gas ni agua de red. Las construcciones son principalmente de material o adobe.

En cuanto a casos de diarreas suelen ser aislados y por lo general se presentan en épocas estivales. La escuela no cuenta con análisis bacteriológicos del agua que beben sus alumnos[3].

Parámetros climáticos:

Temp. Media:	19°C
Temp máxima absoluta:	48°C
Temp mínima absoluta:	-5°C
Precipitación media anual:	736 mm
Cielo despejado al año(días):	110
Cielo cubierto al año(días):	120

En todas las etapas del proyecto los habitantes se mostraron muy solidarios para con el proyecto. Se habló con la mayoría de los habitantes del lugar para explicar el objetivo del mismo y cuáles eran los pasos a seguir y se manifestaron muy interesados en el tema. Muchos sabían que el agua estaba contaminada y habían sufrido algunos efectos de la misma pero no era algo que ellos pudieran manejar. De esta manera y gracias a la colaboración de los lugareños y al compromiso asumido por la partes, la implementación del proyecto fue exitosa.

Prototipo

El prototipo (Figura 1) es un sistema cerrado de tratamiento donde el agua a tratar es depositada en un tanque y circula a través de un fotoreactor, que es el responsable del proceso de desinfección. Cuenta con una bomba de recirculación y controles de temperatura y caudal *on-line*.

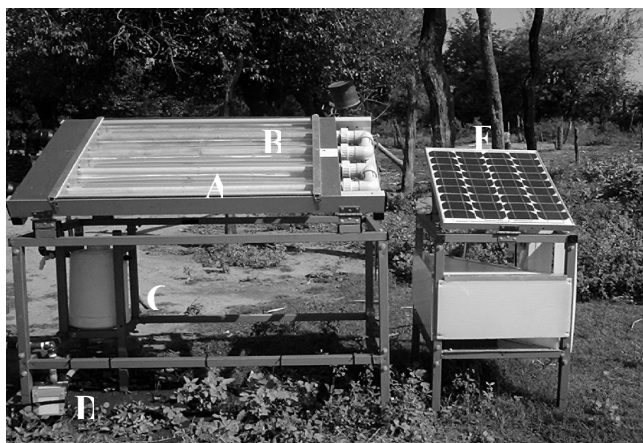


Figura 1. Imagen del prototipo montado. A simboliza los tubos que contienen al semiconductor (2 unidades), B simboliza los que contienen el fotosensibilizador (2 unidades), C el tanque de recirculación. D la bomba del sistema y E el sistema fotovoltaico que alimenta la bomba.

Fotoreactor

El fotoreactor consta de 4 tubos de vidrio de borosilicato. En 2 de ellos se encuentra un soporte con óxido de titanio y en los otros dos un soporte con RuBiPi. El líquido a tratar circula por la sección anular entre el soporte y

el tubo de vidrio. Estos últimos, están ubicados en el foco de espejos concentradores del tipo CPC (concentradores parabólicos compuestos). En estos, la redistribución geométrica que se obtiene luego de que los rayos se reflejan en los espejos, sumado a los efectos de refracción del líquido circulante, posibilitan la concentración de la radiación solar alrededor de una circunferencia [4]. Esta circunferencia está dada por el diámetro del soporte. En la Figura 2 se presenta una vista de corte de uno de los tubos de vidrio del equipo.

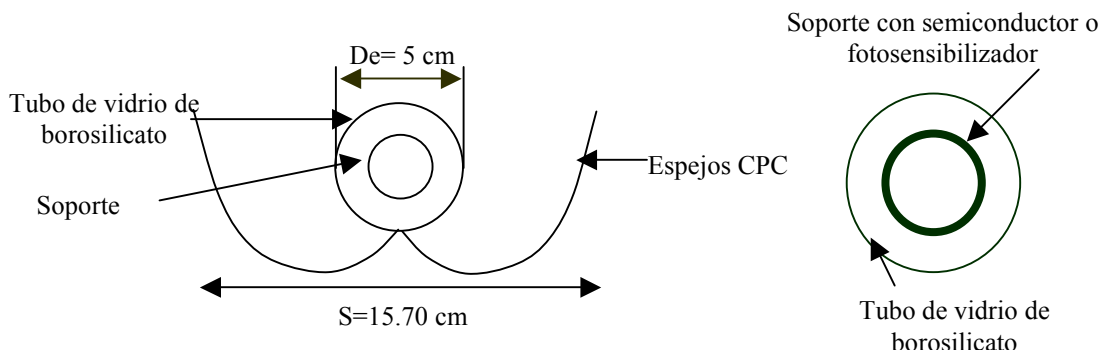


Figura 2. Vista en corte de un tubo del fotoreactor

El bombeo de fluido se realiza a través de una bomba centrífuga con ejes, aspas y empaquetaduras de polipropileno. Estos se utilizan para evitar posibles focos de corrosión y posterior contaminación con bacterias. La bomba se alimenta con un panel fotovoltaico dimensionado para cubrir los requerimientos de potencia de la bomba.

La bomba consume 1.6 A en 12 V lo que da una potencia total de 20 W. En un principio, los ensayos fueron planificados estimando una duración de 6 horas por ensayo por día. De esta manera el consumo diario de la bomba es de $6 \times 1.6 = 9.6$ Ah en 12 V.

Dado que en la planificación de los ensayos se incluyó la evaluación del sistema en días nublados, se estimó la máxima cantidad de días nublados para dimensionar la capacidad de la batería en base a un relevamiento del lugar. La cantidad de días nublados consecutivos no supera 3 para esta localidad, sin embargo el valor tomado fue de 5, valor que es usual en la estimación del funcionamiento de sistemas fotovoltaicos. De manera que la capacidad de almacenamiento de la batería surge de $9.6 \text{ Ah} \times 5 \text{ días} = 48 \text{ Ah}$. Se optó por utilizar una batería convencional de automóvil de 55 Ah en lugar de una de ciclo profundo dado que ante cualquier eventualidad debía poder ser reemplazada localmente, hecho que la de ciclo profundo no permitía. Por otro lado esta última tiene un costo superior. El costo de una batería con capacidad menor a la elegida era el mismo, por lo cual se eligió la de mayor capacidad al mismo precio.

Finalmente, el sistema de tratamiento, fue diseñado para cubrir necesidades en regiones que no cuentan con energía eléctrica.

Sistema fotovoltaico

El panel fotovoltaico tiene una potencia nominal de 38 W m^{-2} . Esto significa que el panel arroja 38 W m^{-2} cuando el sol incide con una potencia de 1000 W m^{-2} .

La potencia que genera el panel es menor que la que consume la bomba por día en los meses de mayo y junio. Esto fue solucionado, por un lado dándole al sistema la inclinación de la latitud del lugar, aumentando así la cantidad de radiación captada en esos meses en un 30 % y en consecuencia la capacidad de generación eléctrica del panel pv y por otro lado, reduciendo la cantidad de ensayos a realizar por semana.

Tubos de vidrio

La elección de tubos de vidrio de borosilicato no va en función de los costos sino en función de su transmisividad al UV. Los vidrios comunes contienen hierro y este impide el pasaje de la radiación UV a través del mismo por lo cual es de vital importancia utilizar vidrio de bajo contenido de hierro o de borosilicato. El proceso por el cual el vidrio común filtra el UV se conoce como solarización y consiste en una toma de la energía solar por parte del hierro del vidrio para llevar a cabo una oxidación-reducción. Los mismos tienen una transmisividad del 45% en el UV-B y de 86% en el UV-A. [5]

Espejos tipo CPC

Los espejos de tipo CPC están constituidos por aluminio anodizado de alta reflectancia, diseñado para brindar una reflectividad del 86% en el UV, con menos del 16% en forma de reflexión difusa[6]. La concentración total del sistema es de 1,15 sol, o sea que la función de los espejos en este caso no es aumentar la radiación sino simplemente redistribuirla alrededor de la circunferencia y compensar las pérdidas de por el material reflectivo.

Procedimientos de operación y ensayos

Se elaboró Dicho un manual de procedimientos, que consta de las siguientes partes, a saber:

- a) Introducción
- b) Ensamblado y puesta en marcha.
- c) Control operativo
- d) Instrucciones para el seguimiento de la radiación solar, temperatura y caudal en línea.
- e) Instrucciones para la toma de muestra
- f) Instrucción para la realización de los ensayos físico-químicos
- g) Registros de datos
- h) Instrucción para el procesamiento de datos y resultados

Dicho manual fue realizado basándonos en los principios de los sistemas de gestión de la calidad con el objeto de tener un manejo ordenado, reproducible y trazable de los resultados obtenidos.

Radiación Solar

La eficiencia del sistema se determina a partir de la energía total depositada en el fotoreactor. y no de la potencia promedio. Para determinar con precisión la cantidad de irradiación depositada en el sistema, se previó medir el dato de irradiancia solar cada 1 minuto para que los datos sean comparables con otras mediciones que en la mayoría de los casos se realizan cada ese intervalo de tiempo. El instrumento de medición es un radiómetro PUV 510 de Biospherical Instruments, provisto por la Red de Monitoreo UV de la república Argentina[7] y que mide la irradiancia en 4 bandas 305 nm, 320 nm, 340 nm y 380 nm. Este instrumento necesita de una computadora y corriente eléctrica para su funcionamiento. En el lugar de emplazamiento del sistema no hay corriente eléctrica, por lo cual el radiómetro debió ser instalado en un lugar adecuado en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Esto genera un error en la determinación de la eficiencia del sistema ya que las condiciones de nubosidad en ambos parajes pueden no ser estrictamente coincidentes. Para solucionar este inconveniente, se añadió el registro de las condiciones del cielo durante los ensayos. De esta manera, podemos saber si el cielo estaba despejado o no durante el ensayo. Contando con este dato, las diferencias entre las mediciones en S. M de Tucumán y Los Pereyra pueden ser corregidas utilizando modelos de transferencia radiativa[8]. Así, la distancia entre ambos lugares no fue un obstáculo significativo al momento de determinar la eficiencia del sistema.

A partir del mes de Junio, se cambió el radiómetro PUV por un Rho-Sigma que mide radiación solar global (0.3-3um) por cuestiones operativas.

Temperatura y Caudal

El caudal de trabajo con las válvulas totalmente abiertas es de 13 L min⁻¹. De esta manera, el tiempo de residencia dentro del reactor de 1 litro de agua a tratar es muy pequeño y no justifica dos puntos de medición a la entrada y salida del sistema. Por otro lado es necesario saber si hay alguna diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del tanque de recirculación. Habiendo hecho mediciones previas se determinó que la diferencia no supera los 2 grados. Por lo tanto, se optó por medir la temperatura a la entrada del tanque de recirculación dado que el acceso a las termocuplas es más sencillo.

Se utilizaron dos termocuplas, una tipo T y otra tipo J. La adquisición de datos se realiza a través de un data logger cada 1 minuto y el mismo nos permite almacenar hasta 8000 datos por canal.

La temperatura del fluido circulante no superó los 50°C.

Planificación de ensayos

En reuniones de coordinación del proyecto se estableció que cada ensayo debe durar, inicialmente 6 horas, es decir 3 horas antes y después del mediodía solar. El cual para el lugar elegido se halla alrededor de las 13:15.-13:30 para esa época del año. La frecuencia de ensayos semanales será de 2 por semana. Esto permite analizar los resultados bacteriológicos entre ensayos, así nos permite coordinar con antelación cualquier cambio necesario en el ensayo subsiguiente. Por otro lado, debemos esperar entre 48 y 72 hs para implementar el siguiente ensayo ya que este es el tiempo en que se reciben los resultados de los bacteriológicos.

Parámetros Físicoquímicos.

Como base para determinar los parámetros físicoquímicos. a medir se utilizó [9].

Se agregaron otros parámetros de medición adicionales que pudiesen afectar el normal funcionamiento del equipo y algunos que consideramos pertinentes para la zona de estudio debido a que se realizaron previamente curvas de caracterización de las aguas a tratar.

Los parámetros de medición seguimos en este proyecto son:

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| ➤ Caudal ¹ | ➤ Nitrato ² |
| ➤ Cielo ¹ | ➤ Fosfato |
| ➤ Temperatura ¹ | ➤ Sulfato |
| ➤ PH ¹ | ➤ Sulfuro |
| ➤ Conductividad | ➤ Hierro ² |
| ➤ Oxígeno disuelto ¹ | ➤ Manganeso ² |
| ➤ Dureza ² | ➤ Cromo VI |
| ➤ Alcalinidad | ➤ SiO ₂ |
| ➤ Turbidez ¹ | ➤ Amonio |
| ➤ Nitrito | ➤ Color ² |

Se realizaron tres tomas de muestras en cada día de ensayo: una al inicio, una al mediodía solar y una al finalizar el ensayo. Los parámetros con superíndice 1 se midieron luego de cada toma de muestra. Los parámetros con superíndice 2 se midieron una vez por semana. El resto de los parámetros se midieron una vez cada quince días. De esta manera no sólo contamos con la caracterización del agua tratada sino también podemos establecer la variabilidad del agua de entrada al reactor y por ende la variabilidad del agua del pozo. Los datos obtenidos se volcaron en los registros que se cuentan a tal fin adjuntos al manual de procedimientos

Parámetros bacteriológicos.

Los análisis bacteriológicos fueron tercerizados en un laboratorio de San Miguel de Tucumán con el objeto de contar con la mayor transparencia en los resultados obtenidos.

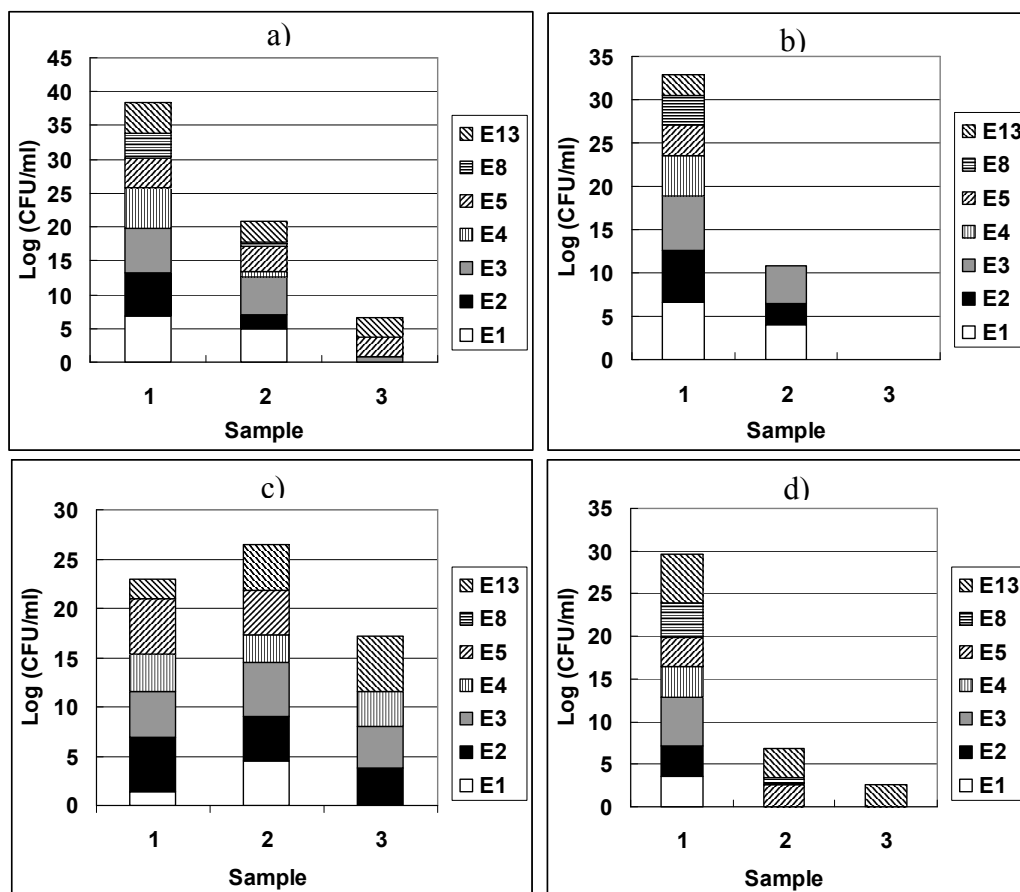
En cada ensayo se tomaron tres muestras para análisis bacteriológicos. Las mismas fueron conservadas en una heladera portátil con hielo hasta el momento de arribo al laboratorio y se tomó una cuarta muestra al final del proceso para evaluar la existencia de recambio de las poblaciones bacterianas.

Los parámetros bacteriológicos medidos fueron:

- Coliformes Totales
- Coliformes Fecales
- *Pseudomonas Aeruginosa*
- *Enterococcus Faecalis*

Las mediciones *in-situ* de los parámetros se realizarán mediante el uso de equipamiento Hach para análisis de agua en campo.

Resultados



Las figuras a ,b ,c y d muestran los resultados de los ensayos para coliformes totales, coliformes fecales, pseudomonas aeruginosa y enterococcus faecalis respectivamente.

Conclusiones

Los ensayos del fotoreactor mostraron resultados muy alentadores. La remoción bacteriana observada, debida a un efecto combinado del stress por radiación (fotocatalisis y fotosensibilización) y stress térmico fue entre excelente y muy buena. No se observó recambio de bacterias en las aguas desinfectadas, después de 24 horas.

El mecanismo de desinfección implica una fuerte interacción entre el fotocatalizador y/o el fotosensibilizador y las bacterias. A diferencia de lo que ocurre en reactores solares de tipo *slurry*[10], las partículas que absorben la luz no pueden viajar hasta la bacteria, y son éstas las que deben transportarse hasta el sólido. Las limitaciones por transporte de masa no parecen haber

inhibido el funcionamiento del reactor. No debe descartarse sin embargo que una pequeña cantidad de TiO_2 soportado pueda ser librado al medio y actuar en el fluido. Tal hipótesis no representa un inconveniente para la tecnología propuesta, ya que el fotocatalizador es inocuo y biocompatible. No afecta tampoco la vida útil del fotocatalizador, ya que ésta se ve limitada más por la formación de depósitos calcáreos (y eventualmente por la colonización bacteriana). La formación de biofilms no se observó, pero sí la depósitos calcáreos (por microscopía electrónica de barrido). Sobre la base de nuestros resultados, puede fijarse una cota mínima para la vida útil del catalizador de tres meses. Dado el bajo costo del mismo, y la sencillez de su reemplazo, esta duración es aceptable.

Por su parte, el fotosensibilizador no libera rutenio al medio, ya que el mismo se halla unido covalentemente a la matriz polimérica. Se observa en cambio una degradación fotoquímica, que hace recomendable no exponerlo a la luz cuando no se encuentra en operación, para prolongar su vida útil. En ensayos previos realizados en Madrid [11] durante el desarrollo del fotosensibilizador, se demostró una vida útil de por lo menos varios meses. Si bien el complejo de rutenio empleado es caro, las cantidades requeridas son muy pequeñas (del orden de 2 mg) y el costo implicado es aceptable. Debe aclararse que por ahora, el fotosensibilizador soportado fue fabricado artesanalmente, por lo que no disponemos de valores posibles si se llega a fabricar industrialmente.

En los últimos ensayos realizado en Los Pereyra se detectó un número residual pequeño, pero no nulo de UFCs de coliformes totales (no así de coliformes fecales, ni de *E. faecalis*). Este efecto puede deberse a una combinación de factores: menor irradiancia, menor temperatura, disminución de la efectividad del fotocatalizador y/o fotosensibilizador, contaminación del reactor. Debe notarse que en todo ese lapso el reactor no tuvo mantenimiento alguno. Las causas de estos resultados están siendo estudiadas en la actualidad, con el reactor instalado en el predio del Centro Atómico Constituyentes.

Referencias

- [1] Blesa, M.A. (Editor), 2001, "Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea", Digital Graphic, La Plata, Argentina.
- [2] Rincón, A.G., Giraldo, S.A. and Pulgarín, C., 2005, "Desinfección de Agua por Fotocatálisis. Aspectos Básicos". In "Tecnologías Solares para la Provisión de Agua Segura", Blesa, M.A. (ed.), Digital Graphic, La Plata, Argentina, *in press*, Chap. 13.
- [3] Warren C. J. 2001, "Hydrogeology and water quality of Los Pereyra, Tucumán, Argentina", MsC thesis, University College, London.
- [4] Malato Rodríguez, S., Blanco Gálvez, J., Maldonado Rubio, M.I., Fernández Ibáñez, P., Alarcón Padilla, D., Collares Pereira, M., Farinha Mendes, J. and Correia de Oliveira, J., 2004, "Engineering of solar photocatalytic collectors", *Solar Energy*, 77, pp. 513-524.
- [5] www.schott.com
- [6] www.alanod.com
- [7] www.dna.uba.ar
- [8] Solar Ultraviolet Radiation, Modelling, measurements and effects. Christos S. Zerefos and Alkivadis F. Bais. Nato Asi Series. Series I: Global environmental Change, Vol 52
- [9] "Equipment verification testing plan for ultraviolet radiation technologies for inactivation of microbiological contaminants", 2003, Epa/nsf etv.
- [10] Cassano, A.E., Alfano, O.M., Brandi, R.J., Martín, C.A., *Diseño de reactores para fotocatálisis*, en *Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea*, Editor M.A. Blesa, Capítulo 10, págs. 201-241. Libro CYTED Digital Graphic, La Plata, 2001. ISBN 987-43-3809-1
- [11] Fernandez P., Blanco J., Sichel C. and Malato S., 2005, "Water Disinfection by Solar Photocatalysis Using Compound Parabolic Collectors", *Catalysis Today*, 101, pp. 345-352.

ABSTRACT

Total coliforms disinfection was obtained in a solar prototype placed at the site "Los Pereyra" located in the province of Tucumán. The test period was from March to June 2005. The reactor has reflectors of the CPC type that concentrate UV and global radiation around four glass tubes, two with a supported photocatalyst and two with a supported photosensibilizer. Polluted water circulates through the annular section between the glass tube and the support with the active material. The pump that moves the water is fed from a photovoltaic panel. The efficiency of the process was evaluated in field conditions and under different sky conditions. Total disinfection could be observed after 6 hours of irradiation. Different physicochemical and microbiological parameters were measured along with the process variables. Factors limiting the maintenance-free life span of the reactor are discussed.